

Курська Т.Н.

Методи визначення міцності і надійності елементів енергетичного комплексу

У статті розглядаються методи проектування і експлуатації енергоустановок, засновані на аналізі номінальних і граничних напружених станів несучих конструкцій і введенні запасів по напруженням

Ключові слова: міцність, ресурс, надійність, деформація

Kurskaya T.N.

Methods durability and reliability to the energy complex

The paper discusses methods of design and operation of energy systems based on the analysis of nominal and limit condition of bearing structures and the introduction of stocks on stresses

Key words: strength, life, reliability, deformation

УДК 614.841; 551.515

*Кустов М.В., канд. техн. наук, зам. нач. каф., НУГЗУ,
Поспелов Б.Б., д-р техн. наук, вед. науч. сотр., НУГЗУ*

**ПАРАМЕТРЫ ИМПУЛЬСНОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ В ЗОНЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ
СИТУАЦИЙ**

(представлено д-ром техн. наук Кривцовой В.И.)

На основе свойств атмосферы и параметров электромагнитного излучения показано преимущество ионизации кислорода за счёт бомбардировкой высокоэнергетичными электронами. Проведена оценка необходимых длительности и периода повторения импульсов СВЧ излучения, обеспечивающих протекание процессов искусственного каплеобразования и коагуляции воды.

Ключевые слова: ионизация газов, частота ионизации, длительность импульса, рекомбинация ионов, период повторения импульсов

Постановка проблемы. Ландшафт территории Украины имеет разноплановый характер. Для регионов с гористой местностью и на территориях бассейнов крупных рек в весенне-осенний период характерны чрезвычайные ситуации, свя-

Параметры импульсного сверхвысокочастотного излучения для интенсификации осадкообразования в зоне чрезвычайных ситуаций

занные с наводнениями. В то же время юго-восточные регионы со степным ландшафтом в летний период испытывают недостаток влаги, что приводит к засухам. Также лесостепные регионы Украины в летний период характеризуются высокой опасностью ландшафтных пожаров. На перечисленные выше чрезвычайные ситуации прямое влияние оказывают атмосферные осадки. Среди возможных способов влияния на атмосферные образования перспективным является воздействие на область атмосферы электромагнитным излучением. Одной из проблем, подлежащих разрешению, является определение параметров электромагнитного излучения при воздействии на атмосферные образования с целью искусственного регулирования интенсивности осадков в районе возможных чрезвычайных ситуаций.

Анализ последних исследований и публикаций. На сегодняшний день основным способом искусственного воздействия на атмосферные образования в районе возможных чрезвычайных ситуаций является введение химически активных солей в зону облака с использованием авиации [1, 2]. Основным преимуществом данного способа является простота технической его реализации. Однако такой способ имеет ряд недостатков – ограниченность условий использования, высокие экономические затраты из-за использования авиации, а также ограниченная площадь воздействия [3]. Основным механизмом влияния на атмосферные образования является введение в предполагаемую зону воздействия центров конденсации, кристаллизации и коагуляции, наиболее активными из которых являются ионы и ионные кластеры [4]. Одним из способов дистанционного создания в атмосфере заряженных частиц, является облучение заданной области пространства импульсами электромагнитного излучения сверхвысоких частот (СВЧ) [5]. Однако вопрос определения параметров такого излучения для искусственного создания центров конденсации, кристаллизации и коагуляции в нижних слоях атмосферы остаётся нерешённым.

Постановка задачи и её решение. Целью работы является определение длительности и частоты повторения импульсного режима электромагнитного излучения, обеспечивающих управляемое протекание процессов искусственного каплеобразования и коагуляции воды для регулирования интенсивности осадков в заданном регионе.

В общем случае для ионизации воздуха может использоваться непрерывный или импульсный режим излучения. Импульсный режим оказывается экономически более выгодным. Однако в случае, когда длительность импульса τ_i излучения не превышает интервал времени T_i между импульсами, выигрыш в энергии у импульсного режима сравнительно с непрерывным невелик и его использование нецелесообразно [6]. При этом длительность импульсов и частота их повторения определяются балансом частоты ионизации и частот рекомбинации, выноса частиц и диффузии [5]

$$f_i \geq f_{rek} + f_{rel} + f_a + \frac{V_w^2}{4D_a} + \frac{D_a}{4h^2}, \quad (1)$$

где f_i – частота ионизации, c^{-1} ; f_{rek} – частота рекомбинации ионов, c^{-1} ; f_{rel} – частота релаксации электронов, c^{-1} ; f_a – частота прилипания ионов к нейтральным молекулам и к твёрдым и жидким частицам аэрозолей, c^{-1} ; V_w – скорость ветра, $m \cdot c^{-1}$; D_a – коэффициент амбиполярной диффузии, $m^2 \cdot c^{-1}$; h – эффективная толщина ионизированного слоя, м.

Проанализируем (1) с точки зрения решения задачи создания искусственно ионизированной области атмосферы на высоте 1-5 км для интенсификации осадкообразования. Ионизация газа в атмосфере под действием СВЧ излучения может происходить либо за счёт поглощения молекулами газа достаточной энергии для ионизации (тепловой ионизации), либо при бомбардировке нейтральных молекул электронами с высокой энергией.

В исследуемом СВЧ диапазоне существенной поглощающей способностью обладают только газы, молекулы которых имеют дипольный момент [7]. Из основных атмосферных газов электрическим моментом обладают молекулы воды и магнитным моментом молекулы кислорода. Концентрация остальных газов, обладающих магнитным моментом, оказывается незначительной и поэтому их влиянием можно пренебречь.

Коэффициент поглощения СВЧ излучения кислородом описывается известным уравнением [8]

$$\alpha_{O_2}(\nu) = \frac{4\pi\nu}{c} \sum_{ij} S_{ij} \cdot f(\nu, \nu_{ij}), \quad (2)$$

где ν - частота СВЧ излучения, с^{-1} ; c - скорость света, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; $f(\nu, \nu_{ij})$ - базовая функция поглощения; S_{ij} - вклад базовой функции, определяемый плотностью газа, температурой и молекулярными характеристиками; ν_{ij} - частота резонансного перехода, с^{-1} .

Известны несколько функций поглощения [9, 10]. Наиболее распространённой является функция Ван-Флека - Вейскопфа

$$f(\nu, \nu_{ij}) = \frac{\nu}{\pi \nu_{ij}} \cdot \left[\frac{\Delta \nu}{(\nu_{ij} - \nu)^2 + (\Delta \nu)^2} + \frac{\Delta \nu}{(\nu_{ij} + \nu)^2 + (\Delta \nu)^2} \right], \quad (3)$$

Решение уравнений (2) и (3) показывает [11], что спектр поглощения для кислорода имеет резонансный характер в двух областях, определяемых резонансными длинами волн $\lambda \approx 0,5$ см и $\lambda \approx 0,252$ см. Использование СВЧ излучения с такими длинами волн будет приводить к значительному его ослаблению. При этом коэффициент поглощения достигает величины $\alpha_{\text{O}_2} \approx 5$ км^{-1} . Соответственно большая часть энергии излучения будет поглощаться в нижних слоях атмосферы и для тепловой ионизации кислорода на высоте 1-5 км потребуются использовать СВЧ излучение с высокой энергией.

Рассмотрим возможность ионизации газов в атмосфере за счёт бомбардировки нейтральных молекул электронами с высокой энергией. В нижних слоях атмосферы при нормальных условиях содержится около 10^6 м^{-3} свободных электронов [4]. Под воздействием сильного переменного СВЧ поля свободные электроны набирают значительную энергию и приобретают способность ионизировать нейтральные молекулы при соударении [12]. Для ионизации молекулы электрон должен обладать достаточной энергией W_{ei} или скоростью u_{ei} , которые связаны между собой уравнением кинетической энергии. Однако по причине того, что масса электрона много меньше массы нейтральной молекулы, электрон при соударении отдает лишь часть своей энергии и, изменив траекторию, уходит от молекулы. Из закона сохранения импульса изменение кинетической энергии электрона (ΔW_e) при соударении определяется величиной [13]

$$\Delta W_e = W_e \cdot \frac{2m_e}{M}, \quad (4)$$

где W_e – энергия электрона до соударения, Дж; m_e – масса электрона, кг; M – масса нейтральной молекулы, кг.

Соответственно для кислорода, обладающего наименьшим потенциалом ионизации среди основных компонент атмосферы ($W_i(O_2^+/O_2) = 12,0697 \pm 0,0002$ eV [14]), необходимая скорость электрона для единичного акта ионизации определяется

$$v_{ei}^{O_2} = \frac{\sqrt{W_i^{O_2} \cdot M_{O_2}}}{m_e}, \quad (5)$$

где $v_{ei}^{O_2}$ – скорость электрона, достаточная для ионизации кислорода, м·с⁻¹; $W_i^{O_2}$ – энергия ионизации кислорода, Дж; M_{O_2} – масса молекулы кислорода, кг, и составляет $v_{ei}^{O_2} = 7,8 \cdot 10^8$ м·с⁻¹.

В случае высокой начальной скорости (или начальной энергии) электрона после его соударения с молекулой и ионизации оставшаяся часть энергии электрона оказывается достаточной для последующих соударений и ионизаций других молекул. Эта ситуация имеет место, если выполняется условие вида

$$W_e - \Delta W_e \geq W_i. \quad (6)$$

Скорость электронов под действием СВЧ излучения определяется [15]

$$\frac{dv_e}{d\tau} = \frac{eE}{m_e} - \nu_m v_e, \quad (7)$$

где τ – текущее время, с; e – заряд электрона, Кл; $E(\tau) = E_0 \cos(2\pi f \tau)$, E – мгновенная напряжённость электрического поля, В·см⁻¹; E_0 – амплитудное значение напряжённости электрического поля, В·см⁻¹; f – частота электрического поля, с⁻¹; ν_m – частота столкновений электронов с нейтральными молекулами, $\nu_m \approx 1,5 \cdot 10^{11}$ с⁻¹ [5].

Второе слагаемое в (7) определяет изменение скорости за счет торможения электронов при соударении с нейтральными молекулами. При скоростях электронов выше ионизационной скорости ($v_e \geq v_{ei}$) при столкновениях, как отмечалось выше, происходит ионизация молекул и рост концентрации заряженных центров конденсации. Так как поле СВЧ излучения имеет переменный характер, решение уравнения (7) носит периодический характер и может быть представлено в виде графика (рис. 1), который показывает, что изменение скорости электронов подстраивается под частоту СВЧ излучения и спадает со временем за счёт соударений с нейтральными молекулами, выходя на стационарный колебательный режим. Использование для интенсификации осадкообразования СВЧ излучения с напряжённостью поля, недостаточной для ионизации (кр. 1, рис. 1), нецелесообразно, так как при сколь угодно большом времени воздействия процесс искусственной ионизации будет отсутствовать. Для воздуха и СВЧ излучения длиной волны 3 см величина $E_{0i} \approx 0,05$ кВ м⁻¹. При условии $E_0 \geq E_{0i}$ (кр. 2, рис. 1), минимальная длительность импульса соответствует первому пику по частоте излучения, однако с точки зрения технической реализации длительность импульса должна превышать длительность первичного пика напряжённости поля и лежать в пределах τ_i (рис. 1). При высокой напряжённости СВЧ поля (кр. 3, рис. 1) даже с учётом торможения электронов о нейтральные молекулы их скорость в любой момент времени достаточна для ионизации газа. В этом случае также выполняется условие (5), при котором имеет место ионизация других молекул. Для рассматриваемого варианта на высоте 1 км при длине волны излучения 3 см такая критическая напряжённость СВЧ поля составляет $E_0^{cr} \approx 114$ кВ м⁻¹.

Из анализа данных на рис. 1 следует, что напряжённость СВЧ поля непосредственно оказывает влияние на частоту ионизации. Длительность импульса при заданной частоте ионизации будет определять общую концентрацию электронов и ионов в заданном объёме.

Для оценки длительности СВЧ импульса, при условии, что $E_0 \geq E_{0i}$, необходимо определить частоту ионизации молекул кислорода. Частота ионизации молекул кислорода за счёт их бомбардировки электронами с высокой энергией определяется, следуя [5], будет определяться

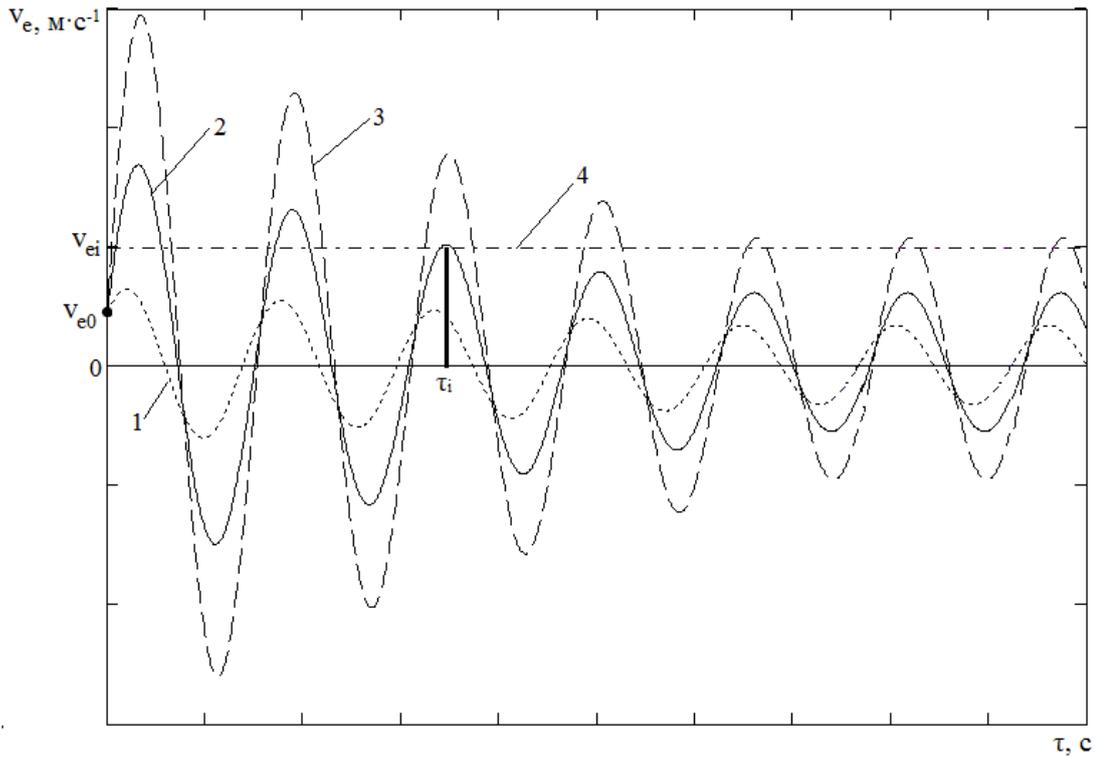


Рис. 1 – Зависимость скорости электронов v_e от времени воздействия СВЧ излучения τ при различной напряжённости поля E_0 : 1 – $E_0 < E_{0i}$; 2 – $E_0 \geq E_{0i}$; 3 – $E_0 \gg E_{0i}$; 4 – $v_e = v_{ei}$

$$f_i^{O_2} = 2,6 \cdot 10^{-7} N_{O_2} \cdot \beta_{O_2}^{-2} \cdot \exp(-\beta_{O_2}), \quad (8)$$

$$\beta_{O_2} = \frac{\sqrt{6} m_e \cdot \gamma_{O_2}}{e \cdot E} \left[\left(\frac{\omega}{1,7 \cdot 10^{-7} N_m} \right)^2 + 1 \right]^{0,5},$$

$$\gamma_{O_2} = \int_{v_0}^{v_{ei}^{O_2}} (f_e \cdot f_{ne})^{0,5} dv,$$

где: $f_i^{O_2}$ – частота ионизации молекул кислорода, s^{-1} ; N_{O_2} – концентрация молекул кислорода, m^{-3} ; N_m – общая концентрация нейтральных молекул, m^{-3} ; f_e – частота соударений электронов, $f_e = v_e \cdot N_m \cdot \sigma_e$; σ_e – транспортное сечение электрона в воздухе; f_{ne} – частота неупругих соударений электронов, $f_{ne} = v_e \cdot N_m \cdot \sigma_{ne}$; σ_{ne} – сечение неупругих процессов.

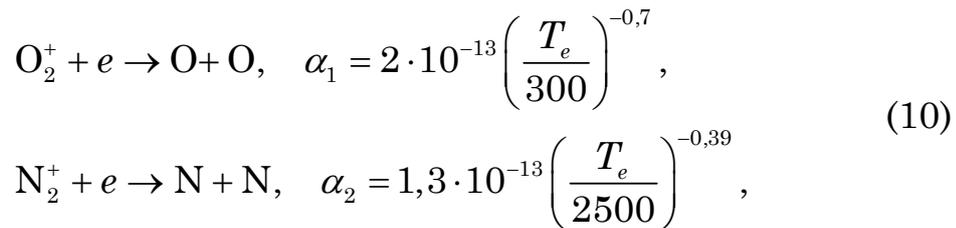
Полученную в (8) частоту ионизации необходимо сравнить с частотами рекомбинации, выноса частиц и диффузии (1). В результате прилипания электронов к нейтральным мо-

лекулам, твёрдым и жидким частицам аэрозолей образуются заряженные частицы, которые также являются центрами каплеобразования и учитываются в общей концентрации ядер конденсации. Поэтому в случае применения рассматриваемого СВЧ излучения для создания достаточной концентрации заряженных центров конденсации учет частоты прилипания для ионов можно пренебречь.

Релаксация свободных электронов происходит за счёт неупругих соударений с нейтральными молекулами воздуха, поэтому частоту релаксации в достаточно точном приближении можно определяют по частоте неупругих соударений электронов

$$f_{rel} = f_{ne} = v_e \cdot N_m \cdot \sigma_{ne}. \quad (9)$$

Диссоциативная рекомбинация является одним из наиболее важных процессов в воздухе. Выделяют два основных процесса диссоциативной рекомбинации [16]



где $\alpha_{1,2}$ – коэффициенты диссоциативной рекомбинации для кислорода и азота, соответственно, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; T_e – температура электрона, К. С учётом (10) изменение концентрации свободных электронов будет определяться

$$\frac{dN_e}{d\tau} = -\alpha_n \cdot N_e \cdot N_i^+, \quad n = 1, 2, \quad (11)$$

где N_e – концентрация свободных электронов, м^{-3} ; N_i^+ – концентрация положительных ионов, м^{-3} . Отрицательное значение правой части уравнения (11) соответствует уменьшению концентрации свободных электронов при рекомбинации.

Как видно из (1) определяющим фактором при определении параметров снижения концентрации свободных электронов за счёт их выноса из зоны воздействия ветром и диф-

фузии является коэффициент амбиполярной диффузии, который для воздуха определяется из эмпирического уравнения [5]

$$D_a \approx \frac{4 \cdot 10^{16}}{N_m}. \quad (12)$$

Для высот 1-5 км значение коэффициента амбиполярной диффузии составляет $D_a = (1,7-2,7) \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Соответственно, при малой длительности импульса и времени между импульсами ($10^{-3} - 10^{-6} \text{ с}$) выносом электронов ветром и свободной диффузией можно пренебречь.

Рассмотрев все составляющие уравнения (1), с помощью выражений (8-11) возможно оценить требуемую длительность импульса τ_i и время между импульсами T_i (скважность) при условии $E_0 \geq E_{0i}$. Для ориентировочной оценки примем, что концентрация заряженных центров конденсации не должна снижаться ниже $C = 10^9 \text{ м}^{-3}$. Значение расчётов для некоторых значений частоты и напряжённости поля СВЧ излучения приведены ниже (табл. 1).

Таблица 1 – Длительность импульса и время между импульсами при некоторых параметрах СВЧ излучения на высоте 1 км

$E_0, \text{ кВ м}^{-1}$	$f, \text{ ГГц}$	$\tau_i, \text{ нс}$	$T_i, \text{ мс}$
0,1	10	10	4,7
0,1	2,45	15	3,2
1	10	10	24,3

Данные показывают, что время между импульсами на шесть порядков превышает длительность импульса. Это свидетельствует о меньшей энергозатратности процесса ионизации сравнительно с непрерывным воздействием и подтверждает эффективность использования импульсного режима СВЧ излучения для искусственного образования осадков в зоне атмосферы. Зная напряжённость и частоту СВЧ излучения можно определить оптимальные значения длительности импульса τ_i и времени между импульсами T_i (оптимальную скважность режима СВЧ излучения).

Выводы. В работе рассмотрен процесс ионизации молекул кислорода атмосферы путем воздействия СВЧ излучения, инициирующего бомбардировку нейтральных молекул кислорода электронами высокой энергии. Показано, что используемые для снижения потерь мощности СВЧ излучения в атмосфере частоты излучения не приводят к существенной тепловой ионизации кислорода. Определены минимальные значения напряженности поля СВЧ излучения, необходимые для ионизации. Приведены ориентировочные оценки длительности импульса и времени между импульсами, которые иллюстрируют преимущество использования импульсного режима СВЧ излучения, позволяющего существенно снизить энергетические затраты на процесс искусственного инициирования осадков в ходе ликвидации и предупреждения возможных чрезвычайных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мейсон Б.Дж. Физика облаков / Б.Дж. Мейсон // Л.: Гидрометиздат, 1962. – 541 с.
2. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы / Л.Г. Качурин // Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 463 с.
3. Порядок проведения работ по искусственному вызыванию осадков из конвективных облаков при борьбе с лесными пожарами с борта легкомоторных воздушных судов. Инструкция: РД 52.04.628-2001. – [Действительный с 2002-03-01]. – Росгидромет. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 18 с. – (Руководящий документ).
4. Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгалюк. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194с.
5. Борисов Н.Д. Искусственная ионизированная область в атмосфере / Н.Д. Борисов, А.В. Гуревич, Г.М. Милих. – М.: ИЗМИРАН, 1986. – 348 с.
6. Гуревич А.В. Искусственная ионизированная область как источник озона в стратосфере / А.В. Гуревич, А.Г. Литвак и др. // Успехи физических наук, 2000. – Т. 170, № 11. – С. 1181 – 1202.

7. Шифрин К.С. Исследование поля микроволнового излучения в атмосфере / К.С. Шифрин, Ю.И. Рабинович, Г.Г. Шукин // Труды ГГО, 1968, Вып. 222, с. 5 – 18.
8. Ulaby F.T. Microwave remote sensing. Active and passive / F.T. Ulaby, R.K. Moore, A.K. Fung // Fundamentals and radiometry, v. 1, - Addison/Wesley Publishing Comp, Reading Mass, 1981, 450 p,
9. Зражевский А.Ю. Молекулярное поглощение в атмосферных парах воды в 0-1ТГц частотном диапазоне [Электронный ресурс]/ А.Ю. Зражевский, С.В. Титов // Журнал радиоэлектроники, 2012. – № 10. – Режим доступа к журналу: <http://jre.cplire.ru/mac/oct12/index.html>.
10. Елютин П.В. Элементарные процессы вынужденного излучения / П.В. Елютин // Квантовая электроника, 2012. – № 3. – С. 192-198.
11. Степаненко В.Д. Радиотеплолокация а метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Шукин, Л.П. Бобылев и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 284 с.
12. Гуревич А.В. Ионизованный слой в газе (в атмосфере) / А.В. Гуревич // Успехи физических наук, 1980. – Т. 132, № 4. – С. 685 – 690.
13. Крапивина С.А. Плазмохимические технологические процессы / С.А. Крапивина. – Л.: Химия, 1981. – 248 с.
14. Mallard G., Linstrom P.J. // NIST Standart Reference Database. 2000. Vol. 69.
15. Дятко Н.А. Кинетика электронов в СВЧ-разряде / Н.А. Дятко, И.В. Кочетов, А.П. Напортович // Высокочастотный разряд в волновых полях. – 1988. – С. 9 - 40.
16. Мак-Ивен М. Химия атмосферы / М. Мак-Ивен, Л. Филипс. – М.: Мир. – 1978. – 375 с.

Кустов М.В., Поспелов Б.Б.

Визначення параметрів імпульсу електромагнітного випромінювання для інтенсифікації опадоутворення в атмосфері

На основі властивостей атмосфери та параметрів електромагнітного випромінювання, що забезпечують протікання процесів штучного каплеутворення та коагуляції води, проведена оцінка необхідних довжини та частоти повторення імпульсів випромінювання

Ключові слова: іонізація газів, частота іонізації, довжина радіоімпульсів, рекомбінація іонів, частота повторення імпульсів

Kustov M.V., Pospelov B.B.

Determination of the electromagnetic radiation impulse parameters for intensification of the precipitation in the atmosphere formation

On the basis of properties of the atmosphere and the parameters of the electromagnetic radiation providing course of artificial teardrop processes and coagulation of water, the assessment necessary for duration and frequencies of radiation impulses repetition is carried out

Key words: ionization of gases, ionization frequency, duration of radio impulses, recombination of ions, frequency of repetition of impulses

УДК 621.396.96

Маляров М.В., канд. техн. наук, доц., НУГЗУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ ЕЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

(представлено д-ром техн. наук Туркиным И.Б.)

Предложено дополнить фацетную модель оптического сигнала, отраженного от морской поверхности, данными про фрактальную размерность. Для этого профиль морской поверхности и распределение интенсивности отраженного сигнала моделируются с учетом фрактальной структуры.

Ключевые слова: фрактальная размерность, отраженный сигнал распределение интенсивность, морская поверхность, фацетная модель

Постановка проблемы. При автоматическом поиске объектов на морской поверхности в качестве критерия обнаружения предлагается воспользоваться изменением фрактальной размерности [1]. В этом случае, при появлении объекта, образуется некая зона неоднородности морской поверхности, фрактальная размерность при этом изменяется, что делает возможным обнаружение зон неоднородностей на изображениях морской поверхности.

Так как мониторинг морской поверхности проводится в оптическом (видимом) диапазоне волн, то для разработки обнаружителя и оценки его показателей качества необходимо смоделировать эталонное распределение интенсивности от-

Маляров М.В.